

$^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数测量*

刘国兴 郑纪文 陈克良

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

SL. Cavallaro M. L. Sperduto

(意大利 INFN 南方实验室)

摘 要

本工作采用在束 γ 谱学技术, 入射能量步长为 0.30 MeV, 测量了 41.6—50.0 MeV $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数。实验结果表明, 激发函数不是平滑的, 似乎呈现较大的起伏, 这些起伏的峰值对应于质心系能量为 27.6 和 28.9 MeV。

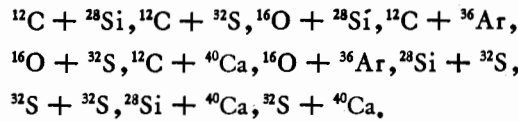
一、引 言

在重离子全熔合反应的实验研究中, 某些反应体系的全熔合激发函数观测到与能量相关的类共振结构, 这些结构迭加在可以用经典模型描写的光滑曲线上。最初在 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ^[1]、 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ ^[2] 和 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ ^[3] 三个反应体系中观测到宽度为几个 MeV 的宽结构, 以后的实验中, 又在 $^{12}\text{C} + ^{24}\text{Mg}$ ^[4]、 $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ ^[5] 以及 $^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$ ^[6] 和 $^{14}\text{C} + ^{16}\text{O}$ ^[6,7] 的反应体系中观测到全熔合激发函数的宽结构。在 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{32}\text{S}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 反应体系的全熔合激发函数观测到宽度为几百 keV 的中间结构, 并且这些中间结构与准弹性转移和非弹性散射道的中间结构密切相关, 许多峰出现在相同能量上。实验结果还表明, 不管是对称体系还是非对称体系, 熔合激发函数的粗结构随能量周期性振荡是以 $2\hbar$ 角动量为间隔的。中间结构的特征表明, 它们产生于双核准分子态, 按照核分子图象, 在重离子反应中形成的核分子态具有单一轨道角动量的转动双核态, 它和集体运动模式相互作用时, 可能分裂成几个具有相同角动量 J 的共振态, 可以设想这些共振就是中间结构共振。OCM (Orbiting Cluster Model)^[8] 认为, 双核态与组合核态间的耦合是弱的, 相应的能级密度是低的, 这时若双核体系有足够长的寿命, 对反应过程发生影响, 就会产生中间结构。OCM 预言, 由 α 结构核构成的反应体系, 最有可能得到小宽度值的共振, 共振宽度与激发能无关, 仅仅依赖于核质量。

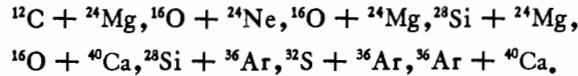
Baye 曾经假设^[9], 对于给定的分波, 对有效位垒高于弹性道位垒的反应道的吸收是不重要的, 借助于开放道数目, 对于各种体系存在共振行为的可能性做出了定性的预言, 有较高可能性共振的体系是:

本文 1991 年 3 月 20 日收到。

* 本工作得到中国科学院科学基金和意大利 INFN 的支持。



还值得研究的体系有:



就全熔合激发函数的实验结果而言,前一组反应体系中的 $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$, $^{12}\text{C} + ^{32}\text{S}$ 和后一组反应体系中的 $^{12}\text{C} + ^{24}\text{Mg}$, $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 已经在全熔合激发函数中观测到明显的共振结构,这样,从实验上证实其它反应体系是否存在共振结构就显得十分必要。

值得注意的是,凡是 ^{12}C 离子参与的由 α 结构核组成的反应体系,都在全熔合激发函数上观测到明显的结构,人们自然会对下一个 α 结构核, ^{16}O 离子参与的反应体系全熔合激发函数的实验研究产生很大兴趣,因为实验结果对于理解振荡结构的起源,推动有关理论模型的发展很有意义。迄今,除了在 $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}^{[10]}$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}^{[11]}$ 反应体系中已经观测到全熔合激发函数中的中间结构外,较重的 $^{16}\text{O} + ^{40}\text{Ca}$ 反应体系^[12]的全熔合激发函数似乎有某些结构存在。对于 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$, ^{28}Si 和 ^{32}S 反应体系尚缺少完整而系统的全熔合激发函数的实验数据。

本工作采用在束 γ 谱学技术,入射能量步长为 0.30MeV ,测量了 $41.6\text{—}50.0\text{MeV}$ $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数,目的在于从实验上证实这个反应的全熔合激发函数是否存在着结构。

二、实验方法

实验是在意大利南方实验室 14MV 串联静电加速器上进行的。引出 ^{16}O 离子束。实验的几何布局如图 1 所示。加速器管道与一个直径为 4.5cm 柱形小靶室做绝缘连接,这样,靶室又可同时做法拉弟筒以检验束流强度。镁同位素靶的丰度为 99.78% ,它被蒸发到 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 金衬底上,靶厚约为 $50\mu\text{g}/\text{cm}^2$,靶子置于靶室中心且与入射束流方向成 45° 角。用金做衬底目的是在束流轰击靶子时,金库仑激发的退激 γ 射线强度作蒸发余核 γ 射线产额的相对归一。三台 GMX-S 型高纯锗 γ 射线探测器均放在反应平面内,距靶子约为 15cm ,相对于束流方向分别为 55° 、 90° 和 125° 。由于 90° 方向有较小的 Doppler 效应,便于用特征 γ 射线

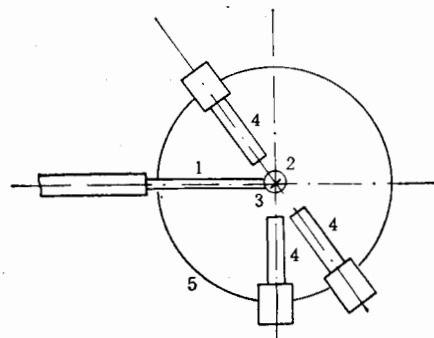


图 1 实验的几何布局

1 加速器管道 2 柱形靶室 3 靶子 4 GMX-S 型高纯锗 γ 射线探测器 5 探测器支架

鉴别核素,用放在 55° 和 125° 方向上的两台 γ 射线探测器测量 γ 射线强度,对四极跃迁来说,可以不考虑角分布效应,因为在这个角度上四极项贡献为零,更高次项的影响是很小的,而且随能量变化又是平滑的。用有多条 γ 射线的 ^{152}Eu γ 源做 γ 射线探测器的能量

刻度和探测效率校准。使用多参数数据获取系统把事件逐个记录在磁带上。每个能量点，束流轰击靶子，在束 γ 数据获取时间约为25分钟，停束5分钟，测量本底和延迟放射性。在停束这段时间内改变加速器的能量，入射能量步长为0.30MeV。

三、实验结果与讨论

实验得到的 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的在束 γ 谱的分析是在中国科学院近代物理研究所VAX-8350计算机上利用LEONE程序进行的。用在束 γ 谱学方法测量全熔合截面最关键的步骤是根据测量的在束 γ 谱对蒸发余核做 A 、 Z 指定。由该质量区域已知的在束 γ 谱学知识，从在束谱中的特征 γ 射线指定蒸发余核。图2给出了50MeV的 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应在与束流方向成 55° 角测量的在束 γ 谱，标出了某些较强的 γ 峰的指定结果。在我们的实验条件下，大多数产额较高核都能观测到几条主要的特征 γ 射线。由跃迁到基态的所有 γ 射线强度的测量得到相应余核的生成截面。在束 γ 谱的处理中也同时处理了 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 库仑激发的退激 γ 射线。由于库仑激发截面随能量的变化平滑且又缓慢，所以，用 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 库仑激发547keV的 γ 射线强度对各条 γ 射线产额进行了相对归一。于是，对于一个给定的蒸发余核 i ，到基态 γ 跃迁强度被归一到Au 547keV跃迁的库仑激发截面 $\sigma_{\text{CE}}(E)$ ，得到该余核的绝对生成截面，

$$\sigma_i(E) = \frac{\sigma_{\text{CE}}(E) A_{\text{Mg}} B_{547} \sum I_K / \epsilon_K}{A_{\text{Au}} t_{\text{Mg}} I_{547} / \epsilon_{547}} \quad (1)$$

对所有蒸发余核求和得到全熔合绝对截面，

$$\sigma_{\text{fu}}(E) = \sum \sigma_i(E), \quad (2)$$

其中 A_{Mg} 和 A_{Au} 分别是镁靶和金靶衬的质量数。 B_{547} 、 I_{547} 和 ϵ_{547} 分别是金库仑激发退激的547keV γ 跃迁的分支比、跃迁强度和探测效率。 I_K 和 ϵ_K 分别是到基态 γ 跃迁的强度和探测效率。 t_{Mg} 是靶厚， $\sigma_{\text{CE}}(E)$ 是金为厚靶时的库仑激发截面，

$$\sigma_{\text{CE}}(E) = \sigma'_{\text{CE}}(E) F(E), \quad (3)$$

函数 $F(E)$ 被定义为靶的有效厚度，

$$F(E) = \frac{1}{\sigma'_{\text{CE}}(E)} \int_{E_0}^E \frac{\sigma'_{\text{CE}}(E')}{\left(\frac{dE'}{dx}\right)} dE'. \quad (4)$$

$\frac{dE'}{dx}$ 取自文献[13]， $\sigma'_{\text{CE}}(E)$ 是薄靶的库仑激发截面，它由下式给出^[4]，

$$\sigma'_{\text{CE}}(E) = C_{E\lambda} E^{\lambda-2} (E - \Delta E')^{\lambda-1} B(E\lambda) f_{E\lambda}(\eta_i \rho_i). \quad (5)$$

其中 E 为入射离子能量。由于金库仑激发的547keV γ 跃迁是 $E2$ 跃迁，所以 $\lambda = 2$ ，

$$C_{E2} = \frac{4.819 A_1}{\left(1 + \frac{A_1}{A_{\text{Au}}}\right)^2 Z_{\text{Au}}^2},$$

C_{E2} 的单位是 10^{-24}cm^2 ，

$$\Delta E' = \left(1 + \frac{A_1}{A_{\text{Au}}}\right) \Delta E, \quad \Delta E = 547 \text{keV}.$$

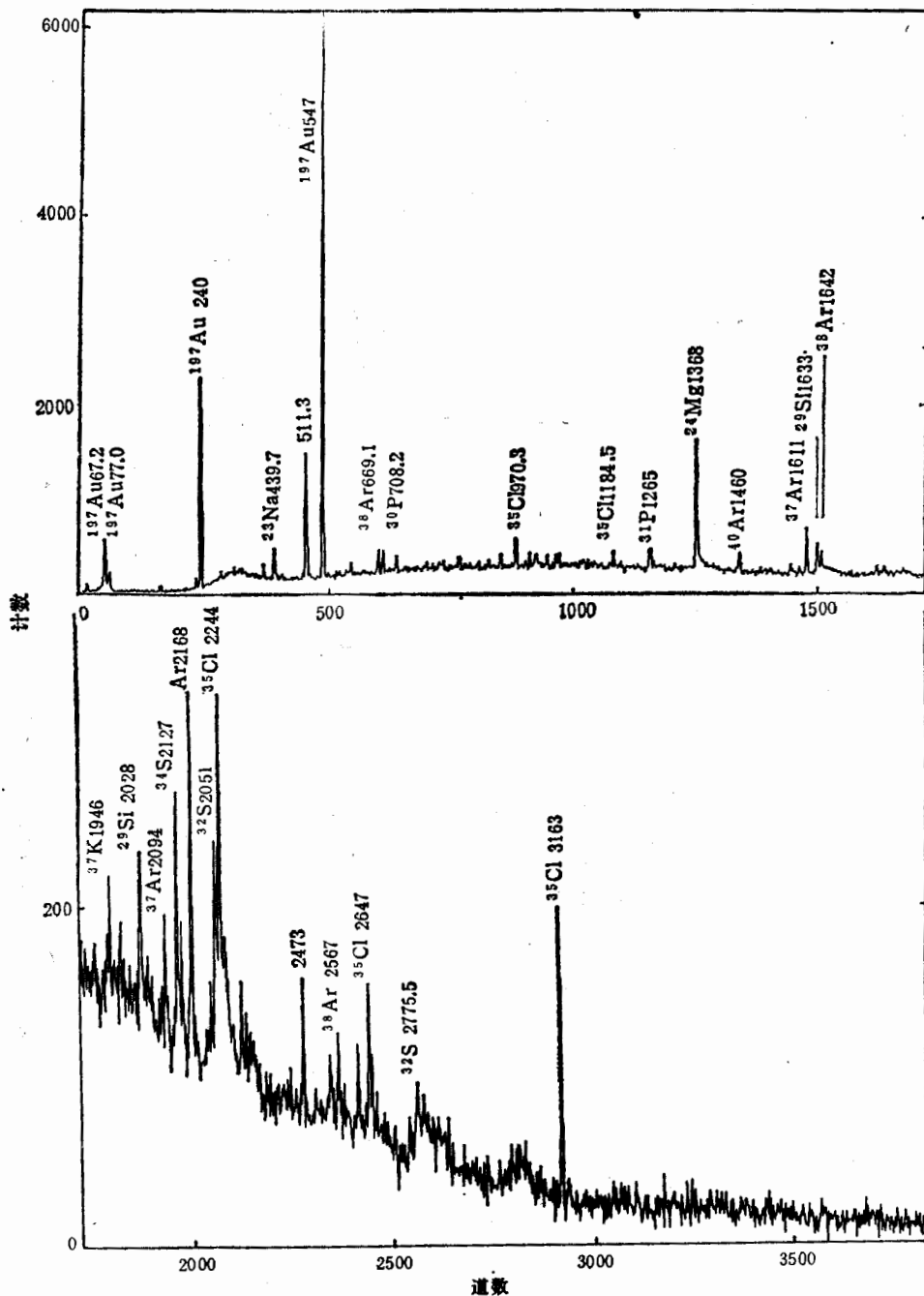
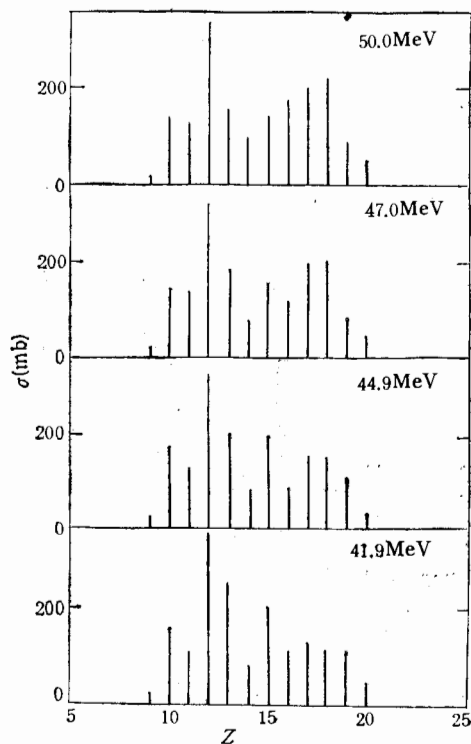
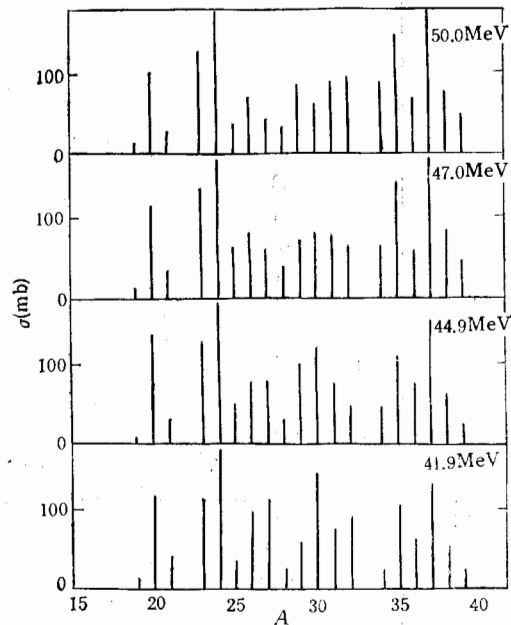


图 2 在与束流成 55° 角方向测量的 $50\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的在束 γ 谱

$B(E2)$ 是约化跃迁几率^[15], 单位是 $e^2(10^{-24}\text{cm}^2)^2$. 函数 $f(\eta_i; \rho_i)$ 由[14]给出.

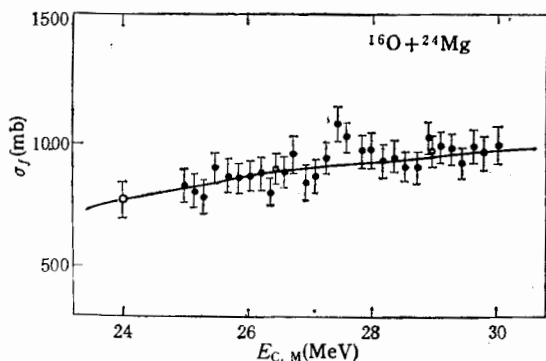
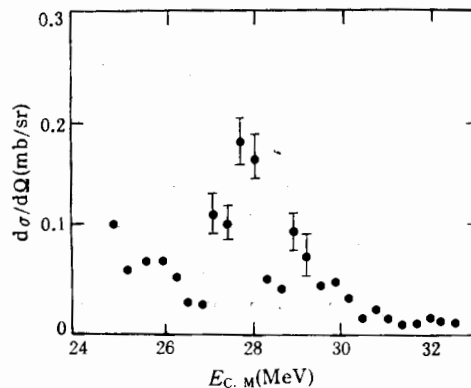
图 3、4 给出了 $41.9, 44.9, 47.0$ 和 $50.0\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应产物的 Z 分布和质量分布. 从图 3 和图 4 可以看出, $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应产物大体上可分为两组, $Z = 14-19$, $A = 28-38$ 自然地指定为全熔合反应的蒸发余核. 在这个质量区域, 除了 $A = 33$ 之外, 其

图3 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应产物作为 Z 函数的分布图4 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应产物的质量分布

余核素全都观测到了。全熔合的质量产额约占整个质量产额的47—55%。全熔合产物的质量分布似乎分为两部分,在入射能量低于45MeV时尤其明显,第一部分在 $A = 28-32$ 范围内,相应于 2α 和 3α 发射道,质量数 $A = 30$ 的峰是核素 ^{30}P ,它来自 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, 2\alpha\text{pn})$ 反应道的贡献。第二部分 $A = 34-39$,相应于 1α 蒸发道和没有 α 发射时核子蒸发道,质量产额有两个峰,一个是在 $A = 35$,核素 ^{35}Cl 产生于 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, \alpha\text{p})$ 反应道,另一个峰在 $A = 37$,包括 ^{37}K 和 ^{37}Ar 两个核素,分别相应于 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, \text{p}2\text{n})$ 和 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, 2\text{pn})$ 反应道。我们看到,当轰击能量降低时, 2α 反应道的产额比例增加了,这似乎表明,在低激发能时,蒸发 α 粒子处在有利地位,这一点在 $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ 反应全熔合激发函数测量中也观测到了。

在质量分布中,未观测到 $A = 33$ 的余核,在复合核 ^{40}Ca 衰变过程中,可能产生 $A = 33$ 的反应道是 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, \alpha\text{p}2\text{n})^{33}\text{Cl}$, $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, \alpha 2\text{pn})^{33}\text{S}$ 和 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, \alpha 3\text{p})^{33}\text{P}$,但是在束 γ 谱中相应于这三种核素的特征 γ 射线都未观测到,我们认为可能的原因是,在激发能较低时,统计衰变中 α 粒子与 p , n 竞争处在更为有利的地位,结果使截面都进入 2α 蒸发道中去了。

第二组 $Z = 9-13$, $A = 19-27$,情况比较复杂。靶子的 ^{12}C 和 ^{16}O 沾污产生的产物可能占有相当大的比例。具有最高产额的质量 $A = 24$ 是靶核,可能有很强的非弹性激发,在 $A = 24$ 附近也会有转移反应引起的靶余核存在。 $A = 20$ 同样有较高的质量产额,似乎有可能部分来自组合核对称的两体分裂反应。关于这个问题,只有通过采用粒

图 5 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数。●—本工作, ○—Tabor 等^[16]。图 6 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$ 反应在 $\theta = 180^\circ$ 的激发函数。

数据取自文献[18]。

子关联测量得到的激发函数的分析才能得出确切的结论。

图 5 给出了 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数,全熔合截面误差约为 $\pm 5-7\%$ 。为了比较,图 5 也给出了 Tabor 等^[16]采用 $\Delta E-E$ 望远镜计数器测量的 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数。图中的实线是根据 Bass 模型^[17]计算的。从图 5 可以看出, Tabor 等的结果由于入射能量的步长大 (4MeV), 实验的全熔合激发函数是一条可以用理论模型描写的光滑曲线。本工作是在有限能区 $E_{\text{CM}} = 25-30\text{MeV}$, 步长 $\Delta E_{\text{CM}} = 0.18\text{MeV}$ 测量的全熔合激发函数,其平均行为与 Tabor 等大步长测量结果以及用 Bass 模型计算结果相符合。然而,本工作测量的激发函数不是平滑的,尽管绝大多数实验点在实验误差范围内可以构成一条光滑曲线,但是,某些能量的截面起伏已经超过了实验误差范围,在 $E_{\text{CM}} = 27.6\text{MeV}$ 激发函数有一个峰,在 $E_{\text{CM}} = 28.9\text{MeV}$ 可能还有一个峰,但未超过实验误差范围。对于 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的激发函数是否存在中间结构,迄今还没有实验数据,但是弹性散射道和 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$ 反应道的激发函数已经有人做过测量,其中 Sanders 等^[18]对 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$ 反应的 180° 激发函数的实验结果表明,呈现有相当复杂的中间结构,如图 6 所示,在 $E_{\text{CM}} = 25-30\text{MeV}$ 范围内最明显的峰出现在 $E_{\text{CM}} = 27.6\text{MeV}$, 另一个峰出现在 $E_{\text{CM}} = 28.9\text{MeV}$, 与本工作测量的全熔合激发函数比较,似乎两者的结果是相关联的。

我们将扩大入射 ^{16}O 离子的能区,对 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] R. L. Parks et al., *Nucl. Phys.*, **A348**(1980), 350.
- [2] A. D. Frawley et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 860.
- [3] B. Fernandez et al., *Nucl. Phys.*, **A306**(1978), 259.
- [4] K. Daneshvar et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 1342.
- [5] W. J. Jordan et al., *Phys. Lett.*, **87B**(1979), 38.
- [6] W. Henning, *Resonances in Heavy Ion Reactions*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg (1982).

- [7] R. M. Freeman, Resonant Behavior of Heavy Ion Systems (1981), P. 41.
- [8] N. Ciodro et al., *J. Phys.*, **G6**(1980), 359.
- [9] D. Baye, *Phys. Lett.*, **97B**(1980), 17.
- [10] J. J. Kolata, *Phys. Rev.*, **19**(1979), 408.
- [11] M. Xapooos et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 2457.
- [12] D. F. Geesaman et al., *Phys. Rev.*, **C18**(1978), 284.
- [13] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *NDT*, **A7**(1970), 233.
- [14] K. Alder et al., *Rev. Mod. Phys.*, **28**(1956), 432.
- [15] J. de. Boer, Treatise on Heavy-Ion Science. Plenum Press, New. York. vol. 1(1985), p. 322.
- [16] S. L. Tabor et al., *Phys. Rev.*, **C17**(1978), 2136.
- [17] R. Bass, Nuclear Reactions with Heavy Ions, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1980.
- [18] S. J. Sanders et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 1810.

Measurement of the Complete Fusion Excitation Function for the $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ Reaction

LIU GUOXING ZHENG JIWEN CHEN KELIANG

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

SL. CAVALLARO M. L. SPERDUTO

(*South Laboratory, INFN Italy*)

ABSTRACT

The complete fusion excitation function for the $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ reaction has been measured in range of 41.6—50.0 MeV in step of 0.30 MeV with in-beam γ -spectroscopy technique. It is shown that the complete fusion excitation function for this system is not smooth and exist some fluctuations. The peak values of fluctuations correspond to 27.6 and 28.9 MeV of center of mass energies.